

# Análisis regional de la contaminación lumínica en Cataluña (2014-2018)

**Trabajo realizado por:**

Daniel Villarroel Torrez

**Trabajo dirigido por:**

Anna Tardà

Jordi Corbera

**Máster en:**

Geoinformación 3<sup>a</sup> Edición

*Barcelona, julio de 2020*

*Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB),*

*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)*

# RESUMEN

Durante el siglo pasado la luz artificial nocturna ha aumentado en intensidad y extensión en todo el mundo. Aunque este fenómeno ha permitido el desarrollo económico, también ha resultado en que cerca del 83% de la población mundial y el 99% de la europea viva bajo cielos contaminados lumínicamente. Esta emisión de luz en forma principalmente de alumbrado público resulta en enormes gastos energéticos y afectaciones a la salud humana. El objetivo de este trabajo es utilizar imágenes satelitales para comprender mejor la evolución espacial y temporal de la contaminación lumínica en Cataluña en años recientes. A diferencia de lo esperado, la mayor emisión de luz (radiancia) se produjo en los meses de invierno y la menor en verano, patrón que se vio prácticamente en todas las comarcas. Las ciudades, los puertos, y las vías de transporte fueron las cubiertas de suelo que más radiancia emitieron: 36% del total con sólo 4,2% de la superficie, a pesar de que los puertos muestran una tendencia a disminuir, las vías de transporte contaminan a un ritmo de casi 3 nW/cm<sup>2</sup>/sr más cada año. Se puede concluir que las imágenes mensuales del sensor VIIRS son muy adecuadas para realizar un seguimiento de la contaminación lumínica a nivel regional, comarcal e incluso municipal, mientras que las imágenes diarias deberían dejarse para aplicaciones muy específicos ya que su uso es más complejo.

## RESUM

Durant el segle passat, la llum artificial nocturna va augmentar en intensitat i extensió a tot el món. Encara que aquest fenomen ha permès el desenvolupament econòmic, també ha suposat que, avui dia, prop del 83% de la població mundial i el 99% de l'europea visqui sota cels contaminats lluminosament. Aquesta emissió de llum, principalment en forma d'enllumenat públic, comporta enormes despeses energètiques i afectacions a la salut humana. L'objectiu d'aquest treball és utilitzar imatges de satèl·lit per a comprendre millor l'evolució espacial i temporal de la contaminació lumínica Catalunya donada en els últims anys. A diferència del que seria d'esperar, l'emissió més gran de llum (radiància) es va produir en els mesos d'hivern i la més petita a l'estiu, patró que es va observar pràcticament a totes les comarques. Les ciutats, els ports i les vies de transport van ser les cobertes de sòl que més radiància van emetre: 36% del total amb només 4,2% de la superfície. Tot i que els ports van mostrar una tendència cap a la disminució, les vies de transport contaminaven a un ritme de gairebé  $3\text{nW}/\text{cm}^2/\text{sr}$  més cada any. Es pot concloure que les imatges mensuals del sensor VIIRS són molt adequades per a realitzar un seguiment de la contaminació lluminosa a escala regional, comarcal i fins i tot, municipal, mentre que, les imatges diàries haurien de deixar-se per a aplicacions molt específiques, ja que el seu ús és més complex.

# ABSTRACT

Throughout the last century, artificial night lights have become more intense and widespread all across the world. Even though this has clearly enabled economic development and growth, it has also resulted in nearly 83% of the world's and 99% of Europe's population living under light-polluted skies. This pollution, which comes mainly from public street lighting, translates into big energy costs for governments and problems to human health. The main objective of this work, is to use satellite images to better understand the spatial and temporal evolution of light pollution in Catalonia in recent years. Contrary to what was expected, more radiance was emitted during the winter months than during the summer. This pattern was observed in practically every region. Cities, sports facilities and road and rail networks were the land-cover categories that emitted more radiance: 36% of the total while occupying just 4.2% of the land surface. Although ports are decreasing their light emissions, road and rail networks are increasing it by almost 3 nW/cm<sup>2</sup>/sr every year. It can be concluded that monthly night-light images provided by the VIIRS sensor can be very useful for monitoring light pollution at a regional, comarcal and even at a municipal level, on the other hand, daily images should be used only in very specific applications given their more challenging use.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
Antecedentes y estado de la cuestión	5
Marco institucional	10
<b>OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
<b>DESARROLLO</b>	<b>12</b>
Área de estudio	12
Productos satelitales de radiancia nocturna	12
Metodología para analizar imágenes del sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)	16
Análisis de imágenes diarias	16
Análisis de imágenes mensuales	18
Intensidad de radiancia	19
Tendencia de la radiancia	20
Estacionalidad de la radiancia	21
Relación con las cubiertas del suelo	21
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>23</b>
Imágenes diarias	23
Imágenes mensuales	24
Intensidad de la radiancia	27
Tendencia de la radiancia	29
Estacionalidad de la radiancia	30
Radiancia por cubiertas del suelo:	32
Otras aplicaciones de las imágenes de radiancia nocturna	36
Cambios por cuarentena en el área metropolitana de Barcelona	36
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>38</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>39</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>41</b>

# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes y estado de la cuestión

Durante el siglo pasado, la luz artificial nocturna ha aumentado considerablemente en intensidad y en extensión en todo el mundo (Bennie et al., 2014). Este dramático cambio está fuertemente asociado con áreas urbanas que contienen múltiples fuentes de luz artificial pública, residencial, comercial e industrial (Levin et al., 2014) y donde la población se ha más que duplicado en los últimos 50 años. Este cambio ha resultado en aproximadamente el 83% de la población mundial y el 99% europeos vivan bajo cielos contaminados lumínicamente (Falchi et al., 2016).

La iluminación artificial durante la noche, por las mismas razones, es uno de los requisitos imprescindibles para la habitabilidad de las zonas urbanas modernas y, en menor medida, de las zonas rurales. También es necesaria para la realización de un gran número de actividades lúdicas, comerciales y productivas, además de mejorar la seguridad ciudadana, reforzar la prevención de riesgos laborales en espacios concretos, y ser necesaria para garantizar la seguridad industrial de determinadas instalaciones.

### **Definición**

Las definiciones de contaminación lumínica son numerosas y funcionales al propósito de su cuantificación. Dicho esto, las definiciones más abarcativas la describen como “*la alteración de los niveles naturales de luz nocturna causado por fuentes de luz antrópicas*” (Cinzano et al., 2000) y “*la suma total de todos los efectos adversos de la luz artificial*” (Comité Internacional de Iluminación, 1997). Finalmente, dado que el presente es un trabajo de percepción remota, la contaminación lumínica puede ser entendida -además- como la luz visible que se emite o refleja hacia el cielo ya que no está iluminando a nivel del suelo, y que es percibida en forma de radiancia.

### **Tipos de contaminación lumínica**

La contaminación lumínica provoca un impacto negativo no sólo por la emisión a la atmósfera de luz artificial y por su posterior difusión a través de las moléculas y de las

partículas en suspensión de la atmósfera (ambas con un comportamiento como fuente secundaria de luz), sino por la iluminación o sobreiluminación de superficies y objetos (Ponce, 2015) En este sentido, las principales fuentes de contaminación lumínica detectables desde el espacio son el resplandor luminoso y la luz intrusa.

La contaminación por resplandor luminoso se debe a la interacción entre las moléculas del aire y los aerosoles con la luz. Su resultado es un haz luminoso que inicialmente tiene una dirección concreta y acaba siendo dispersado por estos agentes en múltiples direcciones, especialmente hacia el cielo. Esta forma de contaminación lumínica se evidencia en noches cubiertas donde las nubes resplandecen con intensidad por encima de zonas urbanas. Este resplandor luminoso nocturno produce un velo en el campo de visión que dificulta las observaciones astronómicas nocturnas ya que se realizan en las longitudes de onda pertenecientes o próximas al espectro visible.

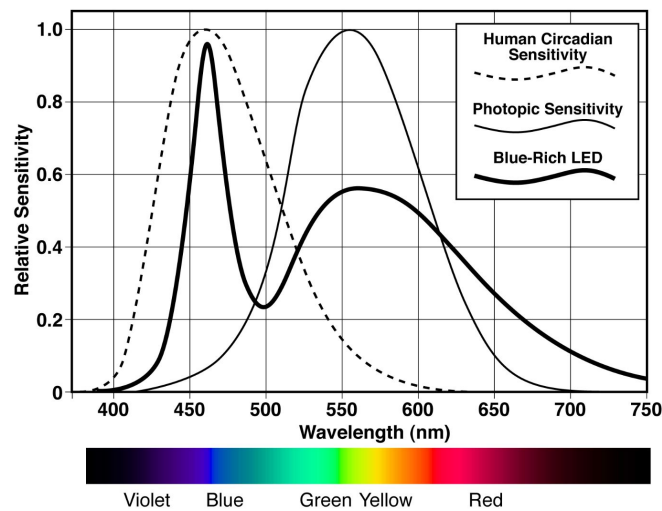
La contaminación por luz intrusa es la invasión de la luz artificial fuera del área de iluminación prevista. Sucede cuando una fuente de luz emite en direcciones que exceden la zona que se pretende iluminar. Se debe principalmente al uso de luminarias con exceso de altura, que no solo iluminan el área de calzada necesaria, sino que emiten luz que incide en los edificios y regiones cercanas. Es común en zonas urbanas, afectando fachadas de edificios, y en consecuencia viviendas residenciales.

### **Aspectos negativos**

La iluminación artificial trae beneficios obvios para la sociedad ya que nos permite desarrollar nuestras actividades en la ausencia de luz natural, y en consecuencia alarga nuestro periodo de horas activas y potencia el crecimiento económico. Sin embargo existen también preocupaciones concretas sobre sus efectos negativos (Kyba et al., 2013), en distintos aspectos más allá de la observación astronómica.

Por ejemplo, un estudio reciente liderado por el Instituto de Salud Global de Barcelona (Garcia-Saenz et al., 2018) en las ciudades de Barcelona y Madrid encontró una asociación entre personas expuestas a niveles más elevados de luz azul artificial y un incremento del riesgo de cáncer de mama y próstata, posiblemente relacionado a la alteración del ritmo circadiano. En una línea similar, Alamús et al. (2017) realizaron una caracterización de los niveles de contaminación lumínica que experimentan los habitantes de la ciudad de Barcelona en los espectros de luz de cinco fotorreceptores

de la retina humana, responsables de proveer señales para la regulación del sistema circadiano.



Sensibilidad circadiana y fotópica del ojo humano en distintas longitudes de onda.  
International Dark-Sky Association (2010)

Al igual que en los seres humanos, se ha demostrado que la contaminación lumínica puede tener efectos sobre la vida silvestre. Existen numerosos estudios de estos efectos sobre el comportamiento de aves (Longcore, 2010), murciélagos (Jung and Kalko, 2010), y peces de agua fresca (McConnell et al., 2010). Cada uno de estos demostrando que la contaminación lumínica puede atraer, repeler y desorientar organismos, y que esto puede alterar sus patrones de comportamiento como la reproducción, alimentación, comunicación e incluso relaciones predador-presa (Longcore and Rich, 2004).

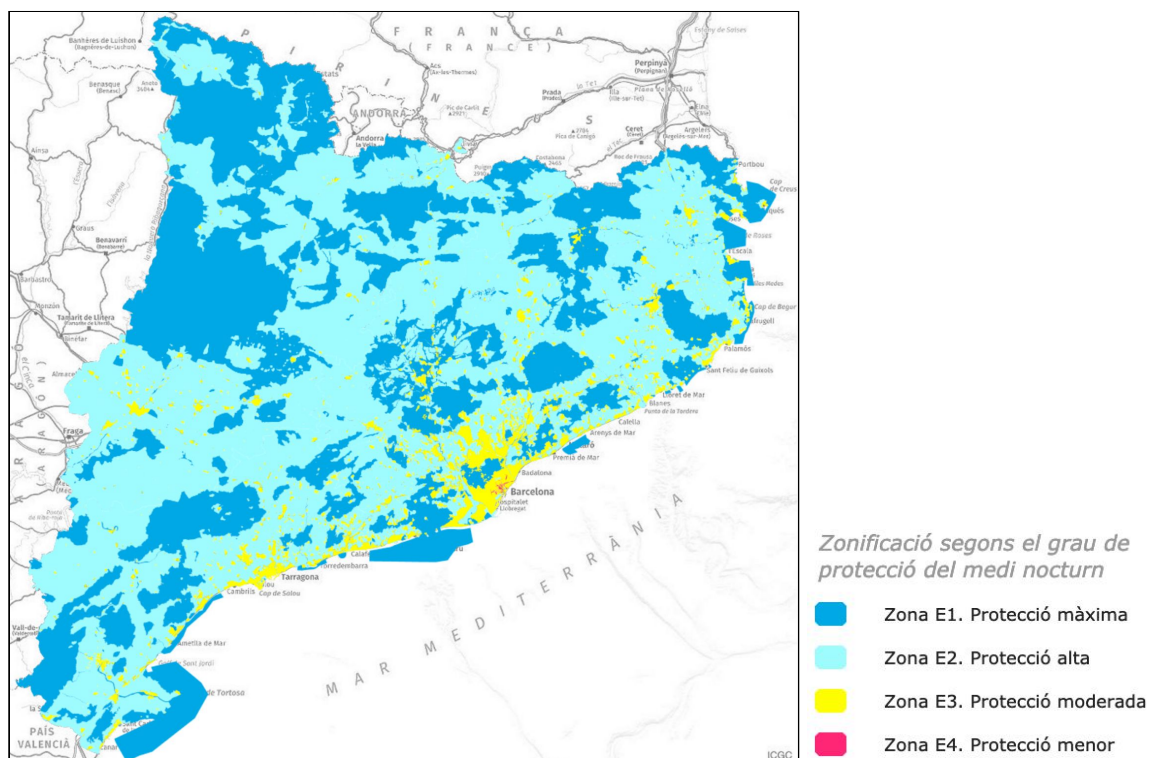
Más allá de los efectos nocivos para la salud de personas y la vida silvestre, la contaminación lumínica podría ser uno de los principales gastos energéticos y en consecuencia fuente de emisión de CO<sub>2</sub> actualmente. La evolución del gasto eléctrico en alumbrado público en España ha crecido en los últimos 25 años a un ritmo de 4% aunque presenta actualmente una desaceleración (Sánchez de Miguel, 2016). El gasto energético de España es de 5.4 TWh/año lo que supone un gasto de cerca de 950 millones de euros anuales. Se ha estimado el gasto en alumbrado público para los países de la Unión Europea, estimando el gasto económico en 6.300 millones de euros anuales. España es el país con mayor consumo por habitante y el segundo posición en valor absoluto. Sin embargo, pruebas piloto en algunas ciudades de Cataluña han demostrado que cambiando el tipo de luminarias se puede ahorrar hasta un 40% de energía.



## Reglamentación

El 16 de mayo del año 2001, el Parlamento de Cataluña aprobó por unanimidad la Ley de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno (Ley 6/2001). Se trató de una ley pionera en España y en el resto de Europa para el cuidado del medio nocturno como principal afectado de lo que se denominó “contaminación lumínica”.

El Decreto 190/2015 lleva a cabo un nuevo desarrollo reglamentario de la Ley 6/2001, que regula los aspectos relativos a las instalaciones y los aparatos de iluminación exterior y a los de interior con afectación en el exterior, con respecto a la contaminación lumínica que pueden producir. Este Decreto tiene como objetivo regular los sistemas de iluminación exterior, y los de iluminación interior en relación con la afectación al exterior, para proteger el medio por la noche, mantener al máximo posible la claridad natural del cielo, evitar la contaminación lumínica, prevenir los efectos nocivos sobre los espacios naturales y el entorno urbano, y mejorar la eficiencia energética de la iluminación artificial con el fin de promover el ahorro de energía y de recursos naturales. Para lograr esto, se propusieron 4 zonas lumínicas en Cataluña.



Mapa de zonas de protección lumínica en Cataluña.

Este Decreto dota a la sociedad catalana de una herramienta para minimizar la contaminación lumínica, velar por la preservación del entorno, evitar consumos energéticos innecesarios y promover tecnologías más eficientes, para avanzar hacia un modelo de consumo de energía que sea sostenible y contribuya al objetivo europeo de descarbonización de la economía, de acuerdo con los objetivos del Plan de la energía y cambio climático de Cataluña 2012-2020.

### **Observación remota**

Más allá de los efectos nocivos que y los desafíos de gestión que presenta la contaminación lumínica, las luces artificiales han resultado ser unas de las evidencias más claras de la impronta humana sobre la tierra observada desde el espacio. En consecuencia, los productos satelitales de presencia e intensidad del brillo emitido por luces nocturnas se han empezado a usar ampliamente a nivel global desde hace ya algunos años.

Entre los ejemplos más interesantes del uso de esta información se encuentran estudios que relacionan mapas de contaminación lumínica con las más diversas aplicaciones como distribución de población (Lo 2001), consumo energético (Letu et al. 2009), actividad económica (Gillespie et al. 2014), Producto Interno Bruto (Elvidge et al., 2009), epidemiología (Kloog et al. 2009) y muchos otros.

Por ejemplo, utilizando los datos del sensor DMSP/OLS se ha podido estimar el consumo total en energía eléctrica de diversos países (Letu et al., 2009). También se han utilizado estas imágenes para la determinación de población develando correlaciones muy claras entre iluminación y población (Lo, 2001). Sin embargo, dada la baja resolución de las imágenes y la ausencia de bandas espectrales, no existen estudios sobre la naturaleza de la emisión, tan solo relaciones estadísticas entre el brillo medido y la población o el consumo eléctrico total (Sanchez de Miguel, 2016)

A una escala más regional, Checa et al. (2018) han explorado las dinámicas de urbanización y su relación espacial y temporal con la contaminación lumínica en Cataluña y el resto de la costa mediterránea de España. Entre las principales conclusiones alcanzadas por estos investigadores está que la ausencia de brillo no indica automáticamente la ausencia de usos urbanos del territorio, y que existe una relación temporal muy marcada de la intensidad de brillo con la intensidad de uso dedicado al turismo en ciudades con una estacionalidad del turismo. Estos resultados

plantean la posibilidad de que la intensidad de la contaminación lumínica puede funcionar como una medida de eficiencia en el uso del territorio.

Finalmente, a una escala más local, Ballesteros (2017) - en su trabajo final de este mismo Máster - realizó un análisis geoespacial de la iluminación de las áreas de protección de contaminación lumínica establecidas por el Decreto 190/2015. Debido a que utilizó imágenes de un sensor aeroportado, este trabajo pudo también analizar la intensidad de luz en calles y vías públicas. Al realizar este análisis con imágenes hiperespectrales producidas por el ICGC, Ballesteros (2017) ejemplifica la utilidad del estudio de contaminación lumínica con herramientas de gran resolución radiométrica y espacial.

## Marco institucional

Este trabajo es el resultado de unas prácticas realizadas en el marco de un convenio entre la **Universitat Autònoma de Barcelona** y el **Instituto Cartogràfic i Geològic de Catalunya** (ICGC). Dentro del ICGC, las prácticas se llevaron a cabo en las instalaciones del Plan Catalán de Observación de la Tierra, bajo la supervisión de Anna Tardà y el seguimiento de Jordi Corbera.

# OBJETIVOS

## **Objetivo general:**

Comprender mejor la evolución espacial y temporal de la contaminación lumínica en Cataluña en años recientes.

## **Objetivos específicos:**

1. Describir la intensidad, la tendencia y la estacionalidad de la radiancia nocturna en Cataluña en el periodo 2014-2018.
2. Relacionar estas características con las cubiertas del suelo.
3. Explorar otros posibles usos de los productos satelitales de radiancia nocturna.

# DESARROLLO

## Área de estudio

Este trabajo tuvo como área de estudio a Cataluña, una Comunidad Autónoma de España ubicada al noreste de la Península Ibérica, y que limita al norte con Andorra y Francia en los Pirineos, al sur con la Comunidad Valenciana y al oeste con Aragón, mientras que al este tiene un litoral mediterráneo con 580 kilómetros de costa. Cataluña además, es el territorio sobre el cual el ICGC es el responsable de ejercer funciones de cartografía, geodesia e infraestructura de datos espaciales.

Su clima es de tipo mediterráneo, aunque con grandes variaciones de temperatura entre el litoral costero, con un clima suave, templado en invierno y muy caluroso en verano; el interior que tiene un clima continental mediterráneo, con inviernos fríos y veranos muy calurosos, y las zonas montañosas próximas a los Pirineos, que tienen un clima de alta montaña, con mínimas bajo cero y nieve abundante en invierno, precipitaciones anuales por encima de 1000 mm y veranos menos calurosos.

Cataluña es el primer destino turístico de España: los 19,3 millones de turistas que recibió entre enero y diciembre de 2019 suponen un 23 % del total de las llegadas registradas en toda España. Sus principales destinos turísticos son la ciudad de Barcelona, las playas de la Costa Brava en Girona y de la Costa Dorada en Tarragona, y la zona pirenaica, que cuenta con 10 estaciones de esquí.

## Productos satelitales de radiancia nocturna

Si bien existe una gran cantidad de sensores montados en satélites disponibles actualmente de manera gratuita, y que debido a su órbita son capaces de generar imágenes durante la noche, la mayoría no han sido diseñados con este propósito, y por lo tanto las imágenes que pueden generar prácticamente no son útiles. Algunas de las características que pueden limitarlos son la sensibilidad a la luz, la resolución radiométrica, o el tamaño del píxel.

Entre los que sí están diseñados para generar imágenes de luz nocturna, existen otro tipo de limitaciones. Por ejemplo, algunos de ellos son de uso militar de ciertas naciones, se encuentran en etapas muy iniciales de su desarrollo, o simplemente son de difícil acceso (burocrático, idioma de distribución, etc.). Además, en caso de poder acceder a alguno de ellos, muchas veces son tan nuevos, que su uso en análisis de series temporales es imposible.

A continuación se describen los sensores satelitales que muestran mayor potencial para ser utilizados en análisis regionales teniendo en cuenta las dificultades mencionadas anteriormente.

Satélite/Cámara	Eros-B	Landsat 8	Luoja 1-01	OLS	VIIRS
Uso Principal	Observación (Israel)	Observación de la Tierra	Observación de la Tierra	Observación de la Tierra	Observación de la Tierra
Rango Temporal	2012-Actual	2013-Actual	2018-Actual	1976-2012	2012 ó 2014-Actual
Calibración	No	Sí	Sí?	No	Sí
Frecuencia temporal	?	?	Anual?	Diaria	Diaria
Resolución	1m	8-30m	130m	2,7 km	460-750 m (aprox)
Sensibilidad	Baja	Muy baja	Baja	Baja	Alta
Comentarios	Uso restringido	Sólo fuentes muy luminosas	Muy nuevo	Legado	Imágenes diarias y mensuales

Tabla adaptada de Alejandro Sánchez de Miguel (2019)

### *El sensor Eros-B*

Es el primer satélite comercial en proporcionar imágenes de luz nocturna de alta resolución (aproximadamente 1 metro). Es operado por ImageSat International. No existe muchas más información disponible sobre este sensor.

### *El sensor Landsat*

El sensor Landsat está diseñado para generar imágenes diurnas, sin embargo, debido a su órbita, este satélite también es capaz de generar imágenes nocturnas, pero su sensibilidad es muy baja. Estas imágenes podrían ser útiles sólo en el caso de fuentes lumínicas muy intensas, pero debido a su baja frecuencia de revisita pierde atractivo tratar de conseguir estas imágenes. Sumado a esto, la resolución radiométrica de las bandas de este sensor imposibilita percibir distintos tipos de luz, como la generado por lámparas de vapor de sodio o halogenuro metálico.

### *El sensor Loujia 1-01*

El Loujia 1-01 es un pequeño satélite diseñado y gestionado por la Universidad de Wuhan, en China. Una de sus características más atractivas es la capacidad de obtener imágenes nocturnas de alta resolución y desde una órbita baja, lo que abre un gran abanico de aplicaciones de luz nocturna. El sensor en este satélite tiene una resolución de 130 metros. Supuestamente este producto es de libre acceso y se puede acceder a él desde el “High Resolution Data Center” del “Hubei Data and Application Center” (<http://www.hbeos.org.cn/>).

### *El sensor OLS*

El sensor OLS del Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) opera desde el año 1976 y es uno de los productos satelitales más ampliamente usados y conocidos, habiendo demostrado ser útil para una gran variedad de aplicaciones científicas. El tratamiento de las imágenes de este sensor corre a cargo del grupo de observación de la tierra (EOG) dentro del Servicio Nacional de datos geofísicos, parte del servicio de datos de satélite y servicios de información (NESDIS) del Servicio meteorológico y oceánico de Estados Unidos (NOAA).

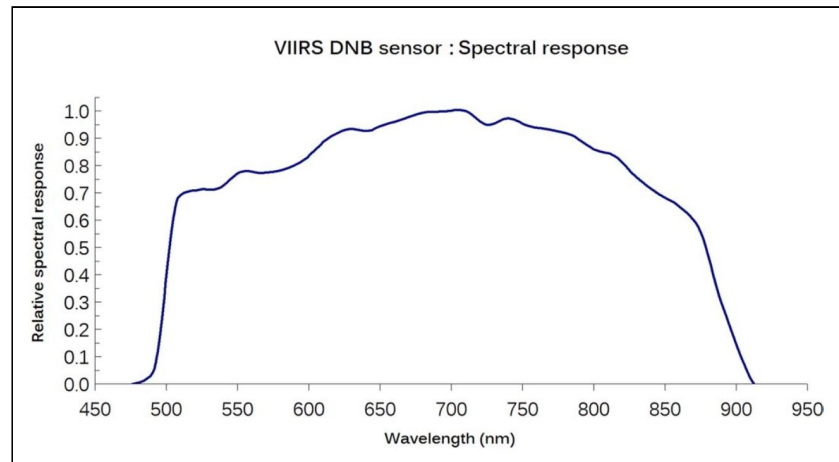
A pesar de su importante legado, este sensor tiene varias limitantes para el estudio de la contaminación lumínica, entre las principales están la resolución espacial muy gruesa, la cuantificación de 6 bit, la saturación de luces, la falta de calibración y la falta de canales térmicos para discriminar luces de fuentes de calor. Actualmente se disponen de datos calibrados o pre-calibrados desde 1996 a 2011, sin embargo no hay aún ninguna publicación definitiva sobre el método de calibración (Sánchez de Miguel, 2016).

*El sensor VIIRS:*

En la actualidad el sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band* (VIIRS/DNB) del satélite SUOMI-NPP es el instrumento más potente disponible en satélites de observación de la tierra que pueden trabajar de noche. Este sensor, que fue lanzado en 2011 por la NASA y NOAA en el satélite SUOMI-NPP, mejora muchos aspectos respecto del DMSP-OLS. Entre los aspectos que se mejoran están la reducción muy importante en el tamaño del píxel, la mayor sensibilidad, el mayor rango dinámico (cuantificación de 14 bit) y la calibración. (Miller et al. 2012). Al igual que el OLS, este sensor genera una imagen nocturna cada 24 horas. Con este instrumento se pueden distinguir unidades básicas de ciudades, tales como aeropuertos, barrios o complejos industriales, aunque no es capaz de distinguir calles.

Adicionalmente, la banda “Day/Night”, registra otros fenómenos que no tienen que ver con la luz artificial, como relámpagos, fuegos, brillo atmosférico y ruido de fondo. Espectralmente, esta banda pancromática cubre las longitudes de onda entre los 500 nm y los 900 nm. Además de generar imágenes diariamente, distribuye un producto mensual y anual de Radiancia promedio (Watts/cm<sup>2</sup>/sr) e informa con qué cantidad de imágenes se ha generado el valor de cada píxel, lo que proporciona una idea de la calidad de ese valor.





Respuesta espectral relativa del sensor VIIRS (Falchi et al. 2016)

El producto de luces nocturnas de este sensor está disponible desde 2012, sin embargo, tiempo luego de su puesta en órbita se generaron modificaciones a la calibración para compensar por filtraciones de luz. El producto definitivo con correcciones para estas filtraciones de luz está disponible desde 2014 y ése es el que se usó en este trabajo.

## Metodología para analizar imágenes del sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)

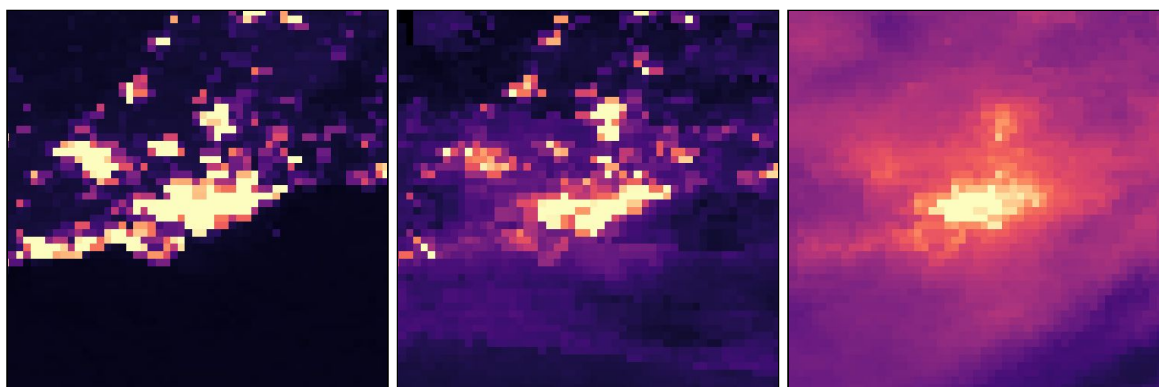
### Análisis de imágenes diarias

Se descargaron las imágenes diarias para explorar el potencial de discernir patrones estacionales y diarios (intra-semanales) de la emisión de luz. Las imágenes diarias de VIIRS son de libre acceso, y se pueden descargar desde <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>.

Primero se descargaron todas las imágenes correspondientes a cada día de verano e invierno de los años 2017 y 2018. Es necesario tener en cuenta que muchas veces pueden llegar a haber más de tres imágenes por noche debido a la revisita, al ancho de barrido de este sensor y al hecho de que Cataluña se encuentra en una latitud media. Para resumir estas imágenes y obtener una sola por día, es posible pedir que se realicen algunos procesamientos previos antes de descargar las imágenes. Uno de ellos es el de hacer un mosaico nocturno en caso de haber más de una imagen para cada noche. Adicionalmente, se solicitó obtener solamente la extensión de Cataluña para facilitar el

análisis y la comparación de las imágenes de distintas fechas. El resultado es una imagen de radiancia por día (en realidad por noche) correspondiente a la extensión de Cataluña.

Si bien existe un producto que indica la presencia de nubes en cada pasaje del satélite, el formato, la extensión variable, y el gran tamaño de este producto lo hace muy difícil de utilizar sistemáticamente y de forma repetida para este análisis, y desafortunadamente no se puede pedir un producto “resumen” como en el caso de las imágenes de radiancia mencionadas anteriormente. En lugar de utilizar este producto de nubes, se exploró cada una de estas imágenes de forma visual en un SIG de escritorio. El rango dinámico y la resolución espacial de las imágenes de radiancia permiten distinguir con facilidad nubes de luces artificiales basado en claras diferencias de contraste y claridad.



Imágenes nocturnas de radiancia sobre Tarragona. De izquierda a derecha: Sin nubes, con algunas nubes, y cubierto de nubes.

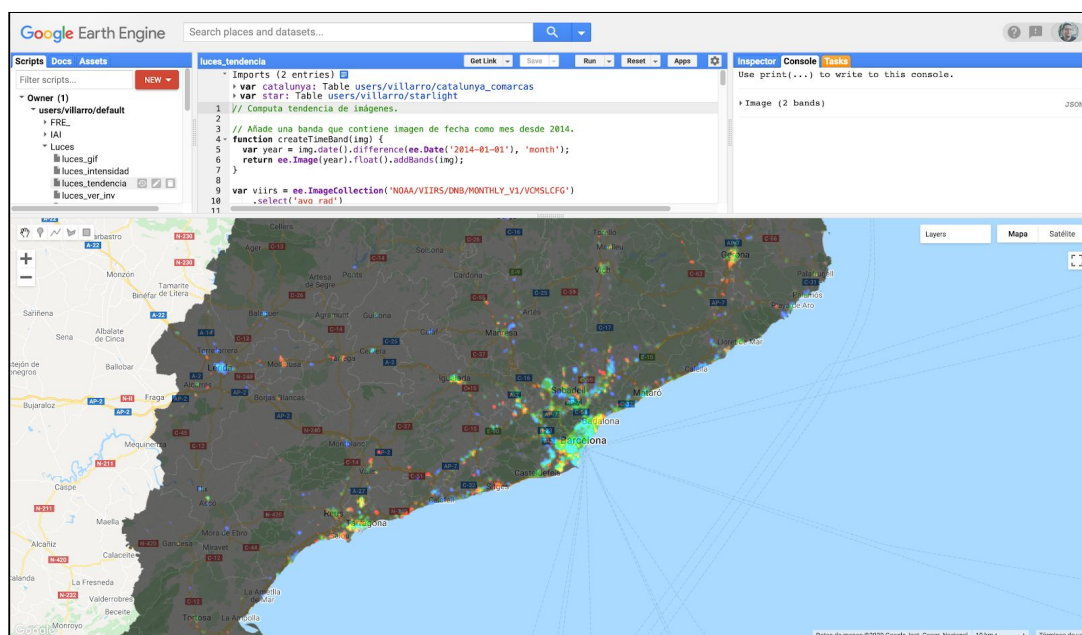
Como se ve en la figura de arriba, el análisis visual de las imágenes con nubes consistió en descartar aquellas que se vean como las imágenes del medio y de la derecha, y mantener las que se veían como la imagen clara de la izquierda en gran parte del territorio de Cataluña.

Una vez filtradas las imágenes con nubes, las imágenes clara se separaron en días hábiles y de fines de semana. Con ellas se realizaron distintas operaciones de álgebra de rásteres para explorar diferencias entre días laborables y no laborales, de invierno y de verano.

## Análisis de imágenes mensuales

Las imágenes mensuales de VIIRS son el producto más robusto que ofrece este sensor para el estudio de series temporales de emisión lumínica. Se usó -además- una configuración alternativa de VIIRS DNB que utiliza un procedimiento para corregir la luz “parásita”. El procedimiento de corrección extiende las áreas visibles más cercanas a los polos y mejora el rango dinámico.

Estas imágenes están alojadas y se pueden descargar de su página de descarga oficial: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>. Sin embargo, en vez de descargar todas las imágenes, en este trabajo se utilizó la plataforma de geoprocesamiento en la nube llamada Google Earth Engine (<https://earth.engine.google.com>). Earth Engine es un servicio de computación en paralelo de alto rendimiento que tiene un catálogo de Petabytes de información geoespacial lista para ser analizada. Para acceder e ella, la forma más sencilla es mediante el entorno de desarrollo interactivo en el navegador web, que utiliza una librería de Javascript. Adicionalmente, es de uso libre para el público en general y para aplicaciones académicas y sin fines de lucro.



Entorno de desarrollo interactivo de Google Earth Engine en el navegador web.

El catálogo de datos de Earth Engine alberga un repositorio monumental de conjuntos de datos geoespaciales, incluyendo productos provenientes de una variedad de satélites y sensores aéreos, en longitudes de onda ópticas y no ópticas, variables ambientales,

clima, cubierta del suelo e información topográfica y socio-económica. Toda esta información se encuentra pre procesada y lista para ser utilizada, lo cual reduce significativamente las barreras a su acceso y a su uso.

Con este set de datos, y con la facilidad de su exploración y procesado en un entorno web, se estudiaron 3 características de la radiancia durante el periodo de estudio: la intensidad, la tendencia y la estacionalidad.

### Intensidad de radiancia

El producto mensual de luces nocturnas tiene dos bandas, una es la radiancia promedio mensual, y la otra indica el número de observaciones sin nubes con la cual se calculó la radiancia en cada mes y en cada píxel. Utilizando esta información, el desarrollo de este resultado consistió en 4 pasos sencillos:

Primero se obtuvo el set de datos de interés a través desde el repositorio de Google Earth Engine:

```
var viirs = ee.ImageCollection('NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/CMSSLCFG')
    .filter(ee.Filter.date('2014-01-01', '2018-12-31'));
```

Luego, en cada imagen mensual se descartaron los píxeles cuyo valor promedio de radiancia se había calculado con menos de 5 observaciones en cada mes.

```
var viirs_filtrado = viirs.map(function(img) {
  var dias_sin_nubes = img.select('cf_cvg');
  var mask = dias_sin_nubes.gte(5);
  return img.updateMask(mask);
});
```

El resultado de esto fue una colección de imágenes que cumplen el nivel de calidad mínimo propuesto. Con este resultado se calculó el promedio de todo el periodo en la extensión de Cataluña.

```
var intensidad = viirs_filtrado.select('avg_rad').mean().clip(catalunya);
```

Finalmente, el resultado se exportó como raster.

```
Export.image.toDrive({  
  image: intensidad,  
  description: 'radiancia_intensidad_2014-2018',  
  region: catalunya.geometry().bounds(),  
  maxPixels:1e11  
});
```

### Tendencia de la radiancia

El cálculo de la tendencia temporal de las imágenes durante el periodo 2014-2018 y la generación del ráster final se realizó de manera similar a la intensidad, con algunas diferencias importantes que se detallan a continuación:

Primero se declaró una función que añade una banda a las imágenes explicitando la dirección creciente del tiempo.

```
function createTimeBand(img) {  
  var year = img.date().difference(ee.Date('2014-01-01'), 'month');  
  return ee.Image(year).float().addBands(img);  
}  
  
var viirs = ee.ImageCollection('NOAA/VIIRS/DNB/MONTHLY_V1/VCMSLCFG')  
  .select('avg_rad')  
  .map(createTimeBand);
```

Al resultado se le aplicó el mismo filtro de píxeles en función del número de observaciones mensuales que se aplicó en el cálculo de la intensidad promedio. Por último, se ajustó una función lineal a la tendencia temporal de las imágenes y se recortó el resultado por la extensión de Cataluña.

```
var tendencia = viirs.reduce(ee.Reducer.linearFit()).clip(catalunya);
```

El resultado es una imagen con dos bandas, una para cada parámetro de la función ajustada: la pendiente y la ordenada al origen.

### Estacionalidad de la radiancia

Al igual que en el paso anterior, las imágenes mensuales fueron filtradas por calidad. Luego, esa colección de imágenes se separó en dos distintas, una de verano que consiste en la mediana de todas las imágenes de julio y otra de invierno con las medianas de los valores de febrero. Finalmente se realizó una resta simple entre estos dos sets de datos para estudiar la diferencia aritmética entre valor de verano y de invierno.

```
var verano = viirs_filtrado
    .filter(ee.Filter.calendarRange(7, 7, 'month'))
    .select('avg_rad').median().clip(catalunya);

var invierno = viirs_filtrado
    .filter(ee.Filter.calendarRange(2, 2, 'month'))
    .select('avg_rad').median().clip(catalunya)

var v_i = verano.subtract(invierno)
```

### Relación con las cubiertas del suelo

En Cataluña existen al menos dos bases de datos de cubiertas del suelo que se pueden utilizar libremente. Una de ellas es el Mapa de Cobertes del Sòl de Catalunya (MCSC), generada por el Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF), la otra es el CORINE Land Cover (CLC), dirigido por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) realizado para los países de la Unión Europea.

Las similitudes entre estos dos productos son varias pero en este trabajo se decidió usar el CORINE Land Cover por dos principales razones. La primera es su vigencia temporal: la última versión del CLC corresponde al año 2018, y por lo tanto corresponde con el rango de tiempo estudiado en este trabajo, mientras que la última versión (V4) del MCSC corresponde al año 2009. La segunda razón, es la diferencia en la extensión las unidades mínimas mapeables: en el CLC, ésta es de 25 hectáreas, mientras que en el

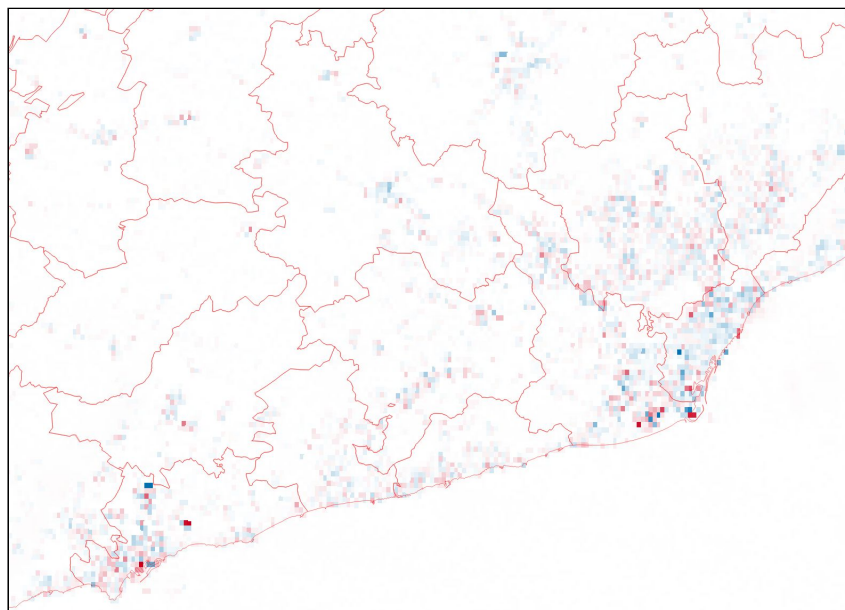
MCSC es de 0.05. Si bien este detalle espacial del MCSC es de gran utilidad en muchas aplicaciones, debido que la superficie ocupada por un píxel de VIIRS es de 12 ha aproximadamente en la latitud de Cataluña, el CLC resultó más apropiado para realizar los análisis.

Se descargó la capa ráster del CLC desde el Land Monitoring Service del Programa Copernicus: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>. A esta capa que cubre los países de la Unión Europea se la recortó por la extensión de Cataluña. Seguidamente se convirtió la capa a vector de polígonos, para estos polígonos se calculó el promedio de la intensidad y de la tendencia de la radiancia. Finalmente, se calculó el promedio de estos valores para cada una de las 35 clases del CLC.

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## Imágenes diarias

Como se puede apreciar en la imagen de ejemplo, la diferencia de radiancia entre un momento y otro del año genera un patrón “salpicado” sin mucha correspondencia con algún patrón espacial. Además al conseguir tan pocas imágenes al año sin nubes en toda su extensión, las diferencias son entre imágenes únicas y no son necesariamente representativas de la época del año. En consecuencia, no fue posible inferir alguna conclusiones partir de estas imágenes.



Diferencia de radiancia entre un día no laboral de febrero y un día no laborable de julio 2017. Píxeles rojos tuvieron mayor emisión durante el verano y píxeles azules mayor emisión durante el invierno.

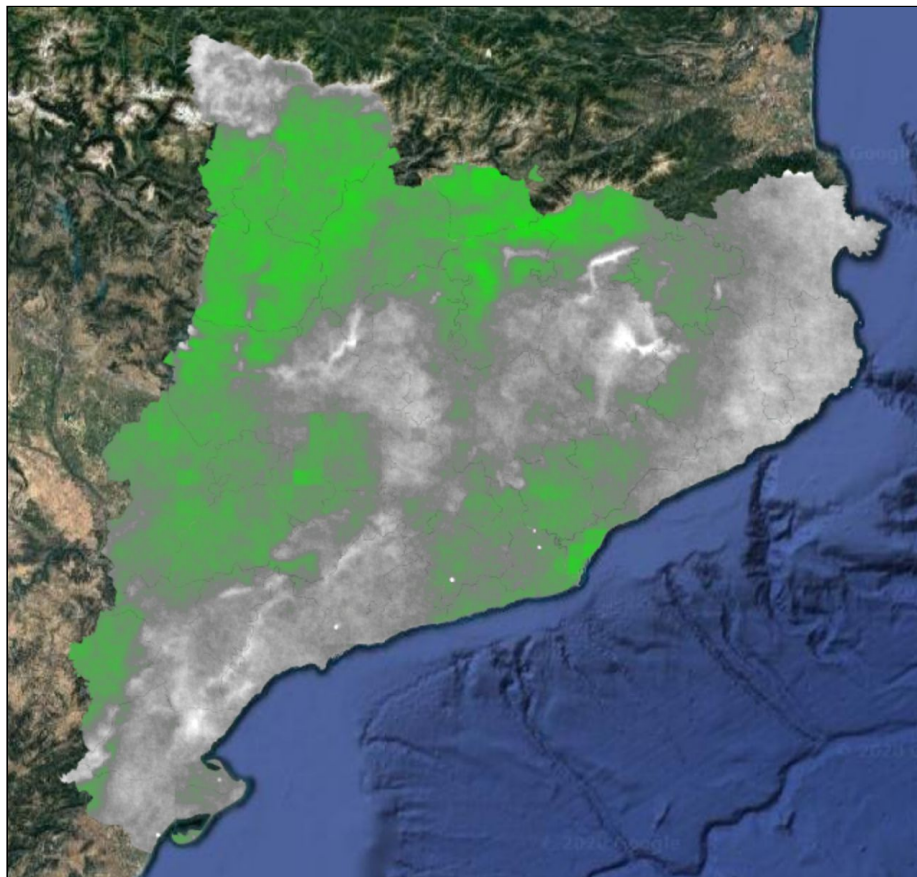
Las imágenes sin procesar pueden ser engañosas debido a que no cuentan con muchos tipos de correcciones necesarias. Entre los factores por los que hay que corregir estas imágenes antes de analizarlas se encuentran la fase lunar, la contaminación atmosférica y la vegetación, incluso la inclinación del satélite pueden afectar cómo es reflejada la luz, y en consecuencia distorsionar las observaciones de las luces artificiales. En este sentido -por ejemplo- para conseguir imágenes generadas desde el mismo ángulo de inclinación del satélite, es necesario usar imágenes separadas por 16 días.



## Imágenes mensuales

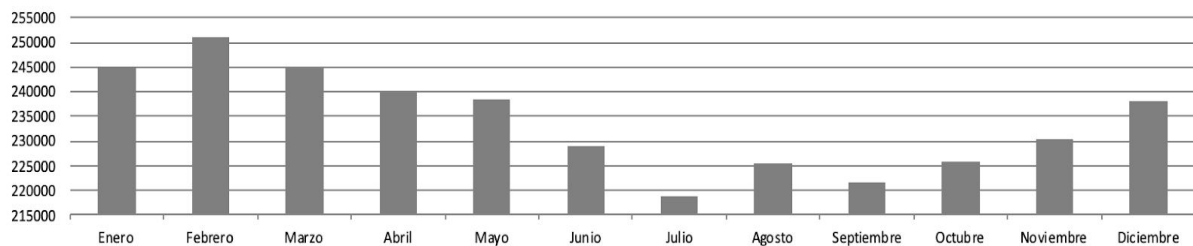
Una parte muy importante de realizar estudios de series temporales es contar con buenos datos. Las imágenes mensuales, al ser promedios con un valor más robusto que las imágenes diarias, pero además proporcionan una estimación de la calidad de los datos, mediante el número de observaciones libres de nubes. Adicionalmente, al usar la plataforma Google Earth Engine fue posible hacer uso de este dato mediante unas pocas líneas de código y generar un producto más confiable.

A lo largo del periodo de estudio, Cataluña presentó promedios de entre 11 y 14 noches libres de nubes al mes. Esto significa que a pesar de que se usaron imágenes con 5 o más días al mes libres de nubes, en promedio cada mes contó con más observaciones buenas en cada píxel para calcular los resultados que se presentan a continuación.



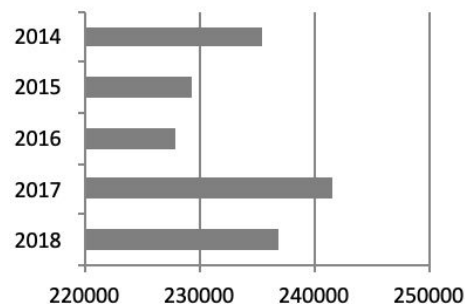
Cobertura de nubes en Cataluña durante el periodo de estudio. Colores verdes significan más días sin nubes en promedio, y colores blancos significan más días con nubes en promedio.

En términos generales, la intensidad de la radiancia en Cataluña es menor en julio y mayor en febrero. Esto va en contra de lo que se esperaba que era ver una mayor intensidad durante los meses de verano. Una posible razón para esto puede ser la presencia de vegetación de hoja ancha caducifolia que puede estar bloqueando la emisión hacia el cielo de luz más en verano que en invierno. Sin embargo, es esperable que exista más de una razón.



Radiancia promedio mensual en Cataluña para el periodo 2014-2018.

En cuanto a la tendencia temporal, parece ser positiva pero con fluctuaciones muy importantes en los últimos años. Es llamativo ver que el año 2016 fue en el que menor intensidad de radiancia hubo, pero el año siguiente (2017) fue el más intenso de los 5 años.



Radiancia anual promedio en Cataluña para el periodo 2014-2018.

Ese patrón se asimila al flujo de turismo durante ese periodo:

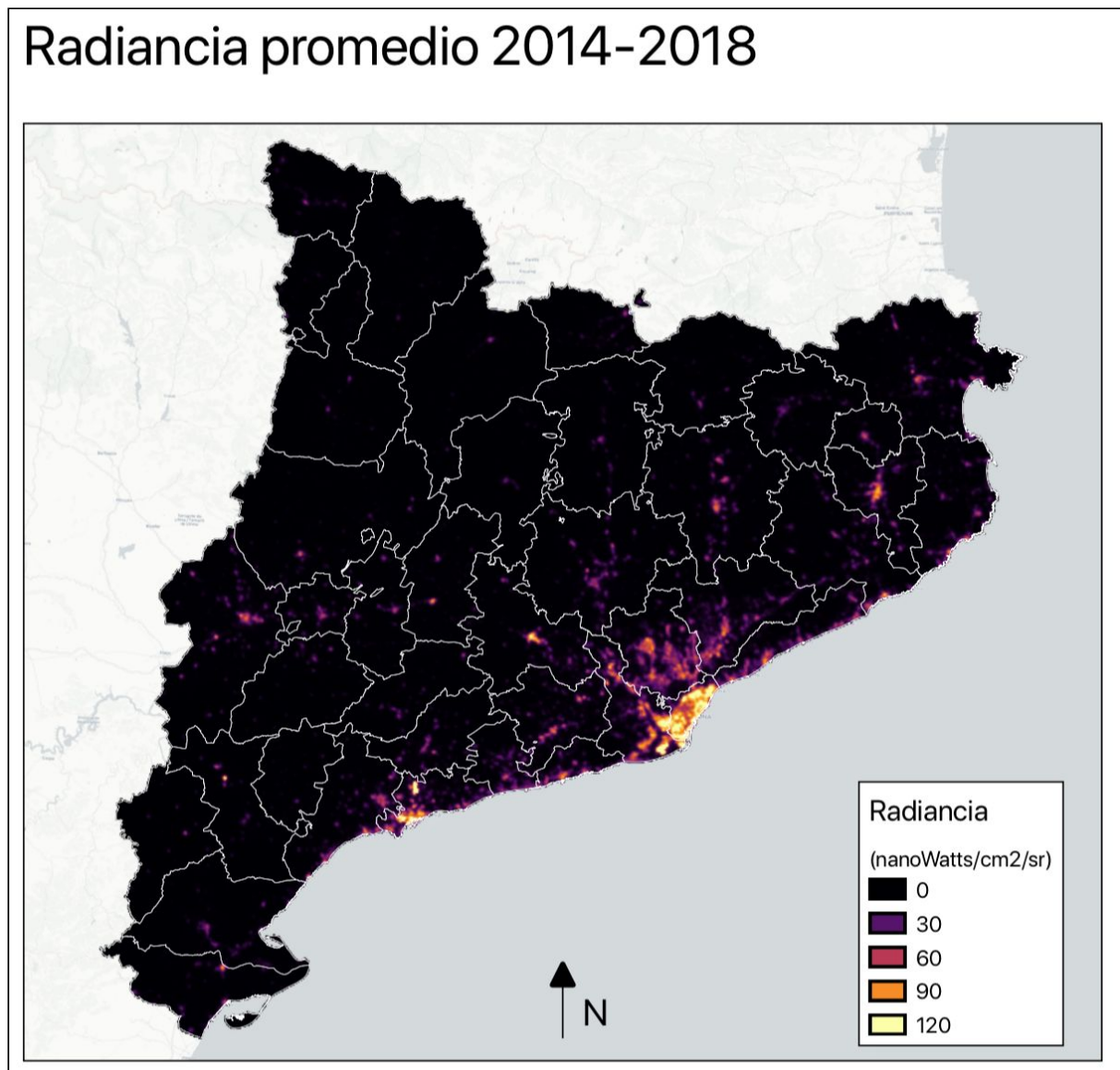
	2015	2016	2017	2018
<b>Viatgers (milers)</b>	<b>20.821,80</b>	<b>22.492,40</b>	<b>23.473,20</b>	<b>23.778,70</b>
Establiments hotelers	17.686,40	19.094,40	19.772,00	20.045,30
Càmpings	2.750,00	3.003,80	3.260,60	3.248,20
Turisme rural	385,4	394,2	440,6	485,2
<b>Pernoctacions (milers)</b>	<b>68.298,40</b>	<b>72.427,50</b>	<b>75.311,00</b>	<b>74.788,10</b>
Establiments hotelers	51.982,10	55.550,60	57.220,50	56.745,30
Càmpings	15.235,70	15.766,20	16.888,40	16.778,00
Turisme rural	1.080,60	1.110,70	1.202,10	1.264,80
<b>Grau d'ocupació</b>				
Establiments hotelers	63,4	67,1	68,8	67,8
Càmpings	42,4	42,7	43,9	43,4
Turisme rural	21,3	21,5	22,3	23,5

Ocupación de alojamientos turísticos 2015-2018. IDESCAT.

Se ve que el año 2017 existe un aumento muy marcado del turismo en general: aproximadamente un millón de viajeros más que el año anterior. La mayor parte se dio en establecimientos hoteleros (770 mil), pero también hubo un aumento de 260 mil viajeros que se dirigieron a campings. Esta cifra es muy significativa, ya que si se atribuye el aumento en la iluminación nocturna al flujo de turismo, tiene sentido que la afluencia a los campings se relacione más que ninguna otra, ya que al estar al aire libre, estos sitios muestran una relación muy directa entre número de ocupantes y superficie iluminada.

## Intensidad de la radiancia

Este resultado se generó promediando todos los valores de radiancia mensuales entre 2014 y 2018. El mapa de irradiancia promedio se presenta a continuación:



Existe una preponderancia marcada de valores altos en las zonas más pobladas de Cataluña, principalmente en Barcelona y Tarragona, con sus áreas metropolitanas aledañas. Por el contrario, es notable la presencia de muy bajos valores en las comarcas ubicadas al oeste de la comunidad autónoma. Se descarta la presencia de pocos datos ya que el mapa de nubes muestra que en esa región había más días sin nubes que en otras partes de Cataluña.

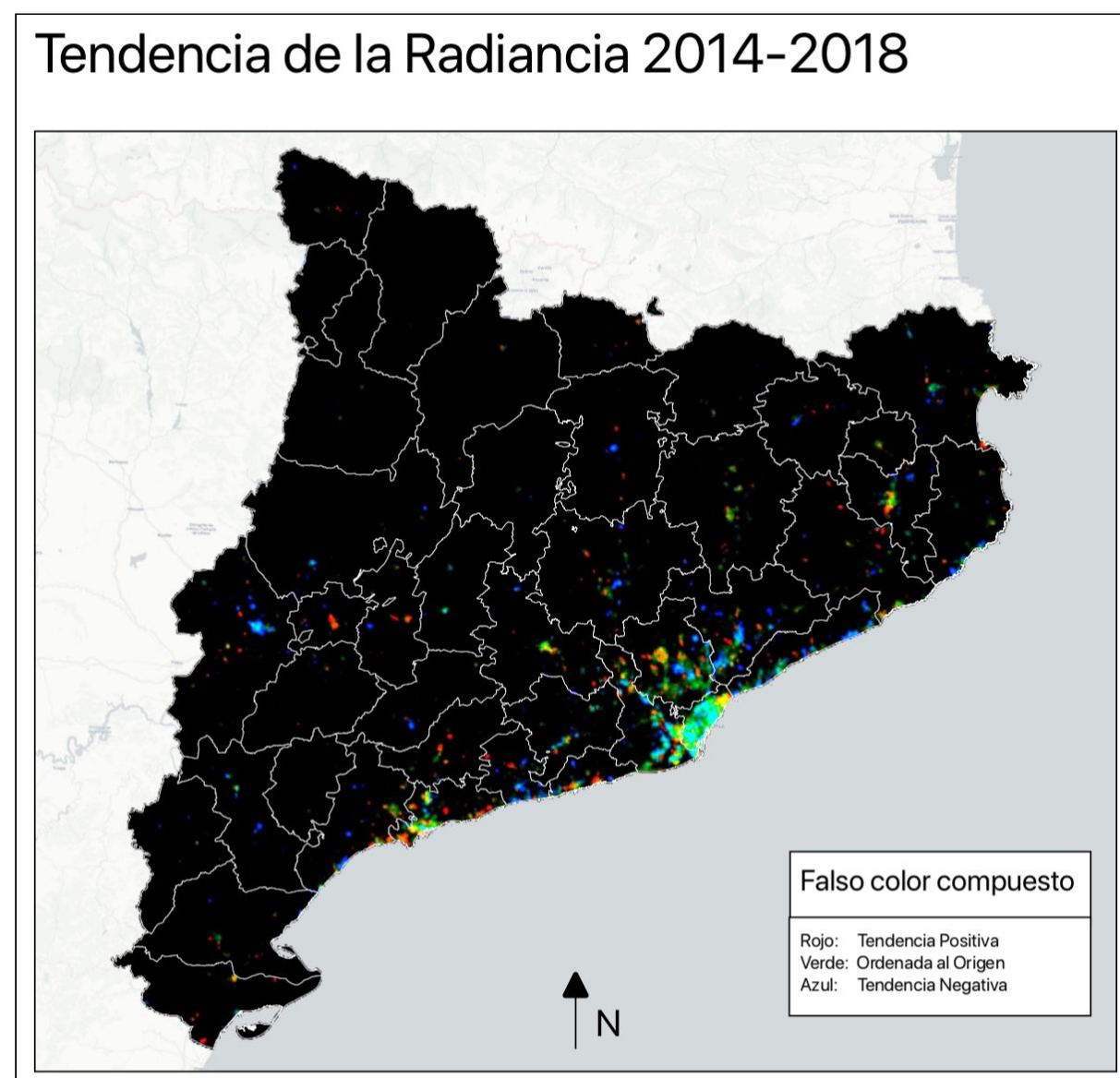
Por otro lado, esto se condice con la denominación de la región del Montsec (Lleida) como Destino Starlight. Los Destinos Turísticos Starlight son lugares visitables, que gozan de excelentes cualidades para la contemplación de los cielos estrellados y que, al estar protegidos de la contaminación lumínica, son especialmente aptos para desarrollar en ellos actividades turísticas basadas en ese recurso natural. También disfrutan de unas condiciones muy favorables las comarcas próximas, especialmente los dos Pallars y la Alta Ribagorça, así como el macizo de la Albera, los Ports de Tortosa o el Monsant, según muestran los resultados preliminares del primer Mapa de la Calidad del Cielo Nocturno de Cataluña.

Una consideración muy importante a tener en cuenta es que el sensor VIIRS es sensible al la longitud del infrarrojo cercano y ciego en la parte azul del espectro visible. Esta característica evita tener un buen registro o seguimiento de la evolución de la contaminación lumínica en esta parte tan importante del espectro visible, en aquellos lugares donde hayan y se estén instalando luces LEDs con altas emisiones (Falchi et al., 2016), así como luces de vapor de Mercurio y Halogenuros con componentes de Mercurio, que todavía existen en ciertas partes de Cataluña.

También es necesario tener en cuenta que los sensores remotos proveen una visión sinóptica de la luz artificial y de la contaminación lumínica (aunque debido a su barrido tan amplio, las imágenes de VIIRS miden radiancia de hasta ángulos de escaneo de 52°, por lo que también representa luz emitida diagonalmente) (Liao et al., 2013), y por lo tanto tienen limitaciones para evaluar la contaminación lumínica como la experimentan las personas, los animales o las plantas: a nivel del suelo y en diferentes direcciones.

## Tendencia de la radiancia

La tendencia de la radiancia no es igual en todo el territorio. A continuación se ejemplifica el mapa de tendencia como una imagen RGB donde en rojo se ven tendencias positivas de radiancia nocturna, en azul tendencias negativas, y en verde la ordenada al origen del modelo para ese píxel, es decir un indicador de qué intensidad de radiancia tiene:



Es de esperar que la tendencia no sea la misma en todo el territorio de Cataluña, en cada comarca hay municipios que pueden estar haciendo las cosas de forma distinta. En general las ciudades más grandes muestra estabilidad en la tendencia pero valor altos

de emisión (como se vio en el resultado anterior), por eso se ven predominantemente colores verdes, donde el valor de la ordenada al origen (la radiancia en el primer año) es más importante que la tendencia que haya mostrado a lo largo de esos años.

Un caso divergente a esto es el de la ciudad de Lleida donde se nota una clara tendencia negativa de la radiancia en los años estudiados. Si bien esta tendencia podría deberse a una tendencia climática o de nubosidad, lo más probable en realidad es que se estén evidenciando los efectos positivos de las iniciativas de esta ciudad para contrarrestar la contaminación lumínica puestas en marcha desde el año 2015 como exige el Decreto 190/2015. La ciudad de Lleida ha instalado LEDs que no emiten nada de luz al cielo, también ha instalado sistemas de regulación y tele-gestión que permiten apagar las luces a medianoche (antes de que pase el sensor VIIRS). Esta tendencia es un ejemplo claro de cómo se puede controlar con imágenes satelitales los cambios en instalaciones en alumbrado público municipal, como indica Sánchez de Miguel (2016)

Es preciso tener en cuenta que la tendencia que se presenta en este resultado corresponde a lo registrado solamente a lo largo de los 5 años de estudio y pueden no estar representando una tendencia a largo plazo. Efectivamente serían necesarios muchos más años de estudio con este sensor para concluir sobre la tendencia de la emisión de luz. Las tendencias regionales o globales pueden no ser tampoco indicadores de lo que sucede a nivel local, ya que, un país como España, en su totalidad puede estar aumentando su contaminación lumínica, pero a nivel local los patrones serán distintos, y son estos los que tienen impacto en las políticas locales también.

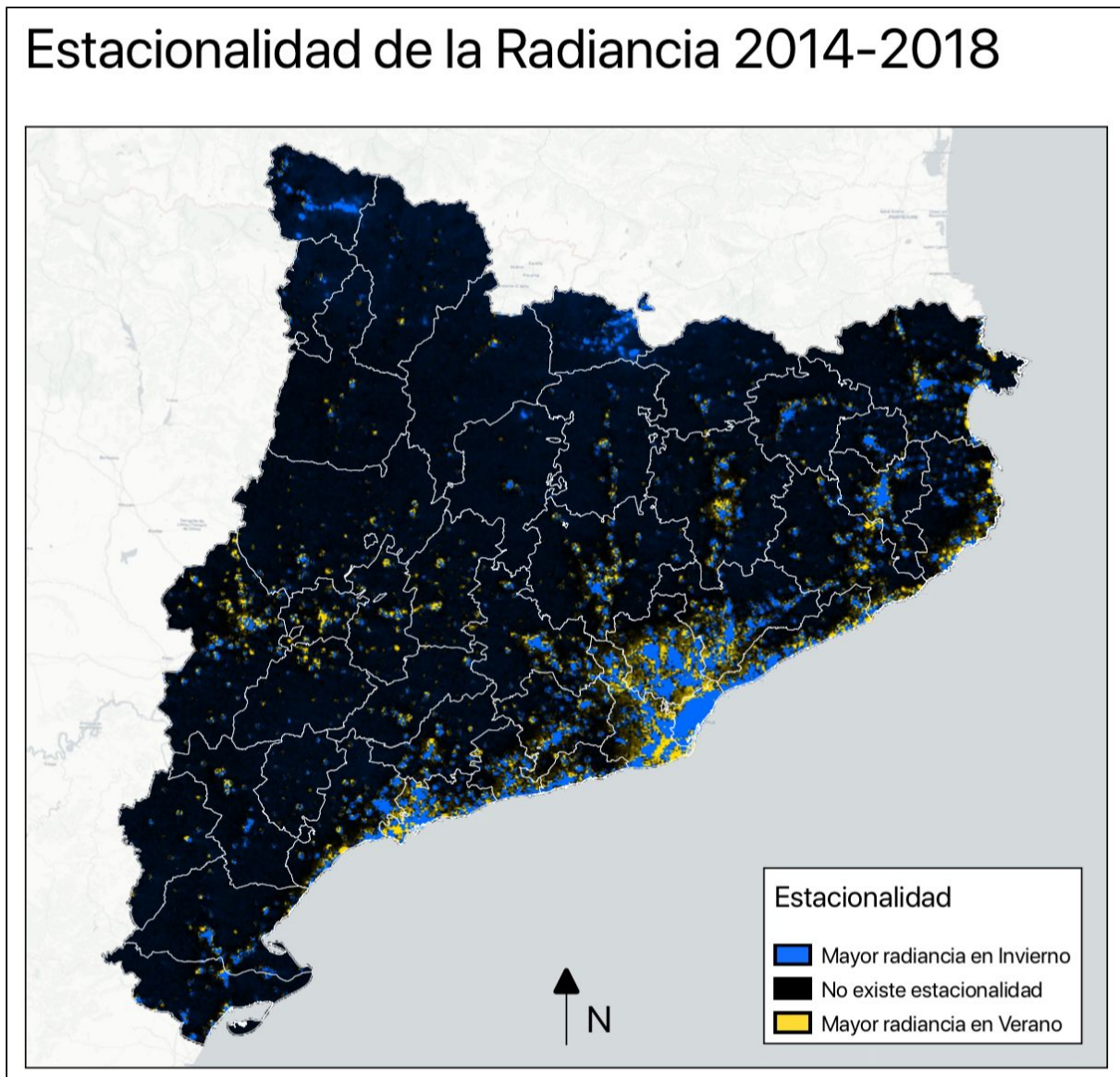
## Estacionalidad de la radiancia

El propósito de este resultado fue ver con claridad los lugares que se muestran más activos en términos de emisión de luz en distintas épocas del año. La estacionalidad de la radiancia se calculó como la diferencia entre los meses de febrero y julio, es decir los meses de mayor y menor intensidad respectivamente de acuerdo a lo encontrado en este trabajo y discutido al principio de esta sección.

Como se puede ver en el resultado de abajo, la emisión de luz en el periodo estudiado fue más intensa durante el invierno (febrero), que durante el verano (julio). Sin embargo existe también una variación espacial: las zonas que tienen mayor emisión durante el



verano parecen ser las zonas aledañas a las ciudades más grandes. A lo largo del litoral el patrón es el mismo, y se puede ver bien en las ciudades de Tarragona y Barcelona.



Este resultado contrasta con lo encontrado por Checa y Nello (2018), que vieron que el verano tuvo un aumento en la emisión correlacionado con el flujo de turismo. Sin embargo en ese estudio, los autores vieron este patrón únicamente en las Islas Baleares, un subconjunto de toda su zona de estudio. En esta región es conocida tanto por la intensidad de urbanización llevada a cabo en los últimos años, así como por la marcada variación estacional en la actividad y la población como resultado del turismo.



Otro aspecto a recordar que la órbita polar de VIIRS es equi-horaria de forma que el satélite pasa siempre aproximadamente a la misma hora (~ 1:30 hora solar), y por lo tanto se puede descartar desfases en el horario de adquisición de los datos en el verano y el invierno. También, la iluminación de las calles es prácticamente constante toda la noche, pero la luz ornamental puede variar fuertemente de temporada en temporada y esto podría estar explicando algunos de los cambios que se pueden ver (Sánchez de Miguel, 2016).

## Radiancia por cubiertas del suelo

No todas las clases de la leyenda del CORINE Land Cover se encuentran presentes en Cataluña. De las 44 clases originales, solamente se ven representadas 35.

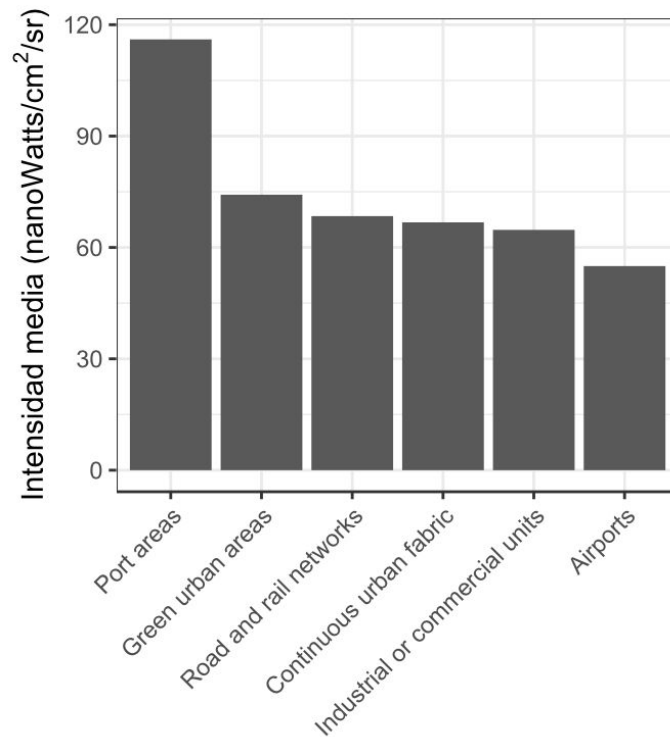
La distribución de la radiancia según clase de cubierta del suelo se distribuye de forma muy desigual. Por ejemplo, sólo cuatro clases de cubiertas emitieron el 36% del total de Cataluña, pero ocupando solamente el 4,2% de su superficie. Estas cubiertas son las siguientes:

Cubierta CLC	Proporción de la Radiancia	Proporción de la superficie
Tejido urbano discontinuo	16,26	2,44
Unidades Industriales o Comerciales	10,12	1,02
Tejido urbano continuo	8,17	0,77
Áreas portuarias	2,32	0,03

Si se observa la emisión promedio de cada clase, se repiten estas clases y se agregan algunas más. El gráfico con la intensidad de radiancia de todas las clases se encuentra en los anexos, pero a continuación se presentan la 6 clases con mayor radiancia promedio.

Lo que primero llama la atención de este resultado es ver que las zonas portuarias con gran diferencia las que generan mayor contaminación lumínica al emitir hacia el cielo

en promedio casi 120 nW/cm<sup>2</sup>/sr. A esta clase le siguen - con valores muy similares entre sí - las áreas urbanas (áreas urbanas verdes y tejido urbano continuo), las redes viales y ferroviarias y por último los complejos industriales y los aeropuertos.



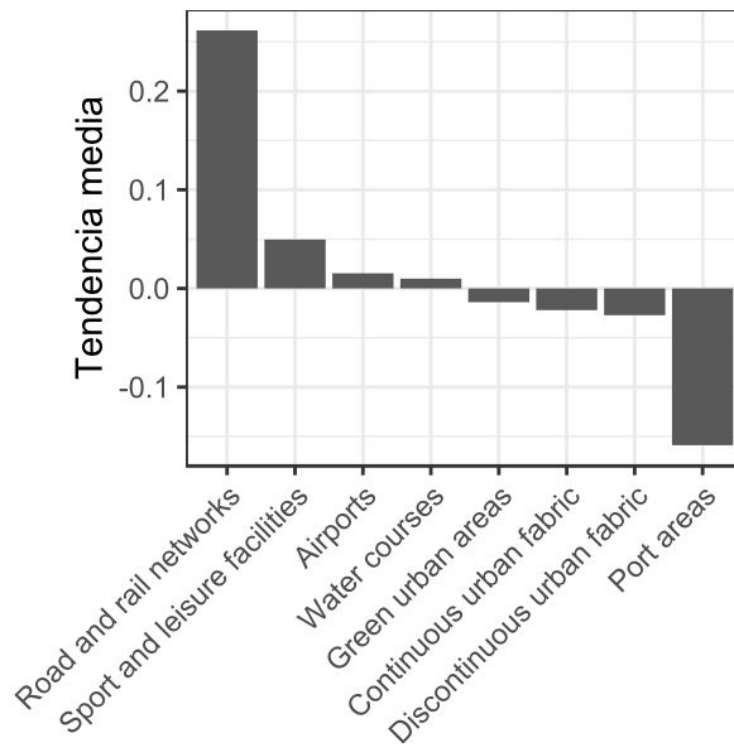
Intensidad de radiancia media para clases de cubierta del suelo.

Es importante destacar que de estas clases de mayor contaminación lumínica, no representa usos humanos intensivos. Solamente las áreas urbanas y tejido urbano continuo representan zonas donde la población vive, mientras que las demás representan usos comerciales, industriales o de transporte. Además es notable que donde sí son zonas urbanas la de mayor emisión son zonas urbanas verdes, lo que puede estar indicando una sobre-iluminación de áreas verdes.

Es notable que los usos deportivos no se encuentran entre los primeros puestos (se encuentra en el puesto 9, con 10 nW/cm<sup>2</sup>/sr). Esto puede ser debido a que su emisión es eventual, y también a que muchos de los eventos deportivos seguramente suceden antes de las 01:30 hs, cuando pasa el satélite que contienen el sensor VIIRS.

En cuanto a la tendencia de la radiancia, se presentan en el siguiente gráfico las clases con las tendencias más altas y más bajas. La tendencia es la pendiente del modelo lineal que se calcula para cada pixel. Debido a que el cálculo se realizó con las imágenes

mensuales, el valor de la tendencia representa un aumento o disminución de esa unidad de radiancia en esa clase, cada mes del periodo de estudio. De esta manera, una clase que tiene una tendencia de 0.1 a lo largo de los 60 meses de estudio, habrá aumentado en total  $6 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$  en el mismo periodo.

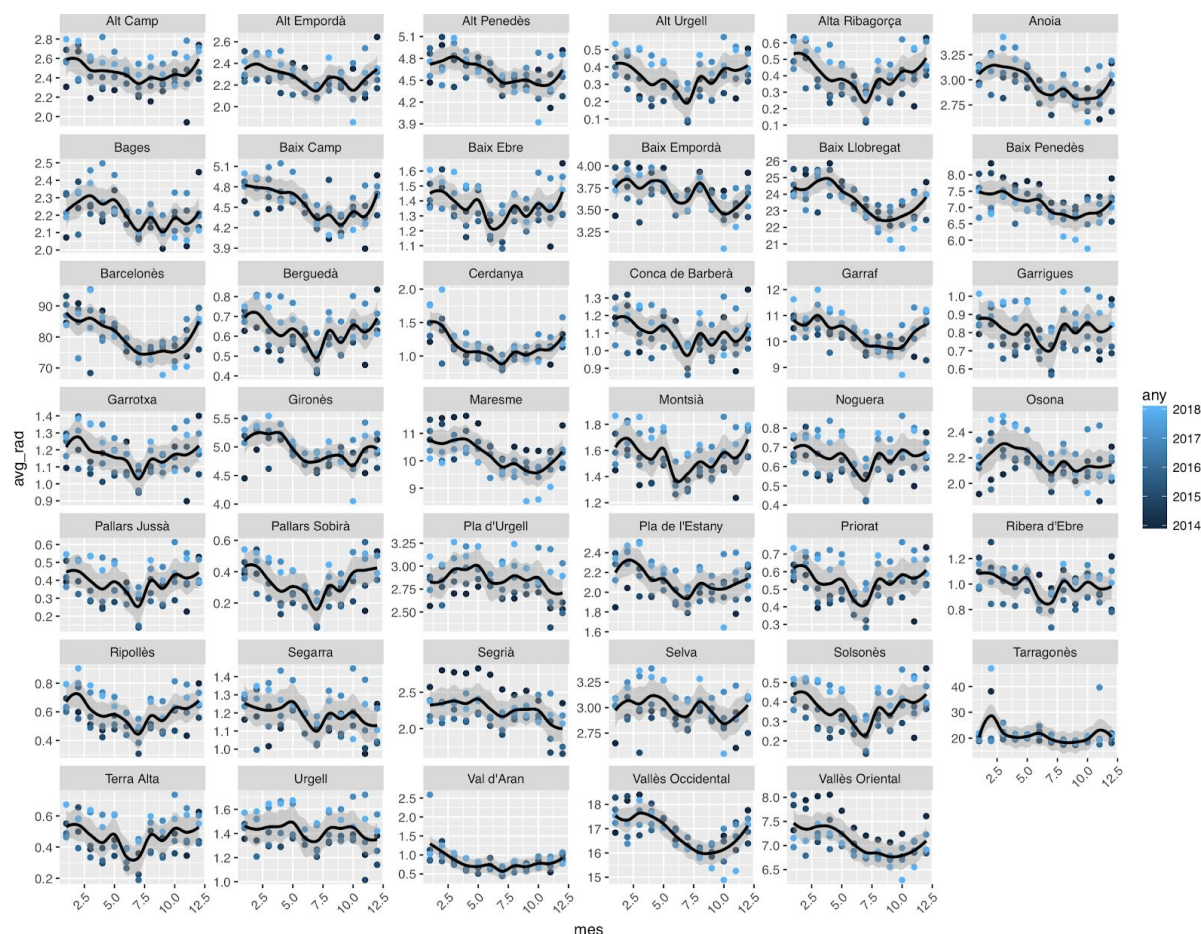


Tendencia en  $\text{nW/cm}^2/\text{sr}$  de las cubiertas del suelo en el periodo de estudio.  
El mismo resultado con todas las clases se encuentra en los anexos.

De las seis clases con mayor cambio durante el periodo de estudio, las dos más llamativas son la de los extremos: redes viales y ferroviarias, y áreas portuarias. Estas clases son la tercera y la primera, respectivamente, en cuanto a intensidad de radiancia. No es coincidental que en las clases con mayores intensidad es de radiancia, las tendencias en el tiempo también sean mayores. Salvo estas dos excepciones, las tendencias de cambio es muy pequeña, casi despreciable, en todas las clases de cubierta de suelo.

### Radiancia por comarcas:

Se muestran los resultados de la intensidad de radiancia para cada mes y cada año de estudio, además de una línea que marca su comportamiento modelado.

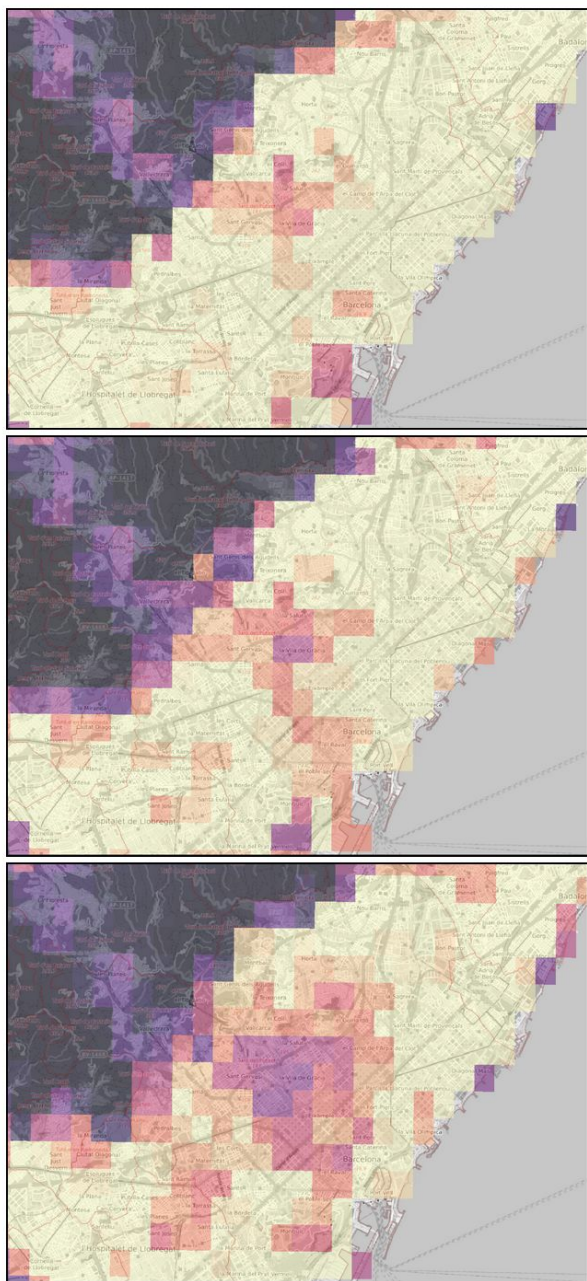


Si bien a nivel de toda Cataluña hay un patrón claro de más radiancia en invierno y menos en verano, cuando se analiza cada comarca se pueden ver patrones más variados. A primera vista existe un comportamiento similar, como es de esperar, sin embargo es necesario tomar en cuenta que las magnitudes del eje Y en cada gráfico varía según la comarca y los resultados no son comparables horizontalmente directamente.

Siguiendo los colores (más oscuro es más antiguo y más claro es más reciente) también se pueden ver patrones. En la mayoría de los casos los años más recientes muestran valores más altos en todos los meses. Excepciones a esto son las comarcas del Baix Penedès, Maresme, Segrià y Vallès Oriental.

## Otras aplicaciones de las imágenes de radiancia nocturna

### Cambios por cuarentena en el área metropolitana de Barcelona



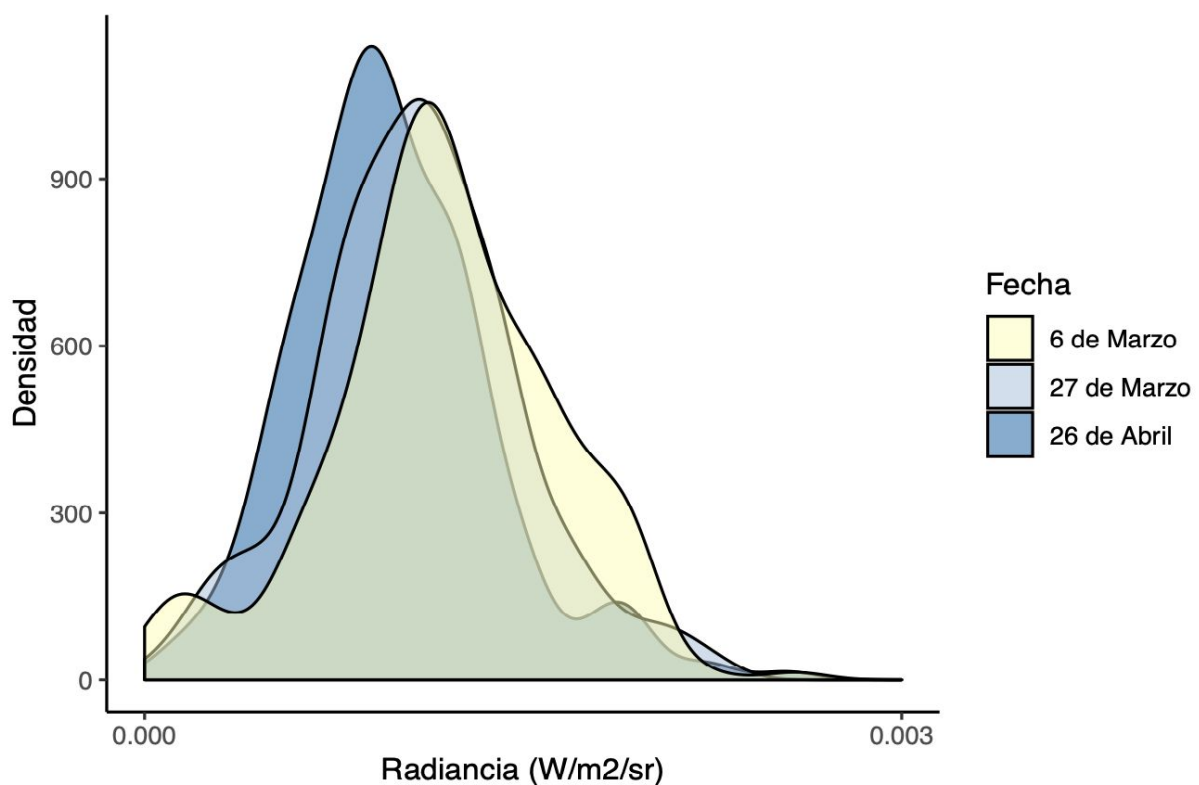
Durante la realización de este trabajo de fin de Máster surgió la oportunidad de explorar ciertos fenómenos a través de su impacto en la emisión de luz artificial. El más reciente de estos fenómenos fue la implantación de una cuarentena total en España, y en Cataluña a partir del domingo 15 de marzo de 2020.

Con el supuesto de que las luces artificiales están relacionadas en una ciudad a la actividad humana, se exploraron imágenes diarias utilizando el mismo método de descarte visual de nubes descrito anteriormente. En este caso se hizo énfasis en la ciudad de Barcelona que es la urbe más grande y poblada de Cataluña. Se seleccionaron 3 imágenes, una de antes de la cuarentena, otra de 12 días luego de implantada, y otra de más de un mes de cuarentena. De arriba a abajo, en la figura de la izquierda se ven las imágenes del 6 y el 27 de marzo, seguidas por una del 26 de abril.

Se notan cambios muy claros en la radiancia de ciertas partes de Barcelona durante el confinamiento. Quizás el más claro es la disminución de la radiancia en los distritos de Gràcia y Sant Gervasi y en menor medida el Eixample a lo largo de Paseo de Gràcia y Rambla de Catalunya. En estas zonas

la magnitud de la radiancia disminuyó notablemente mientras la del resto de la ciudad se mantuvo igual.

Razones que pueden explicar esta disminución podrían ser el cierre completo de terrazas o la disminución drástica en el transporte público, dado que esta zona de la ciudad cuenta con una gran superficie de consumo al aire libre, además de ser un eje de transporte muy importante.



Histograma de píxeles de radiancia antes (6 de marzo) y después (27 de marzo y 26 de abril) de la cuarentena.

Al observar la distribución de los valores de radiancia en Barcelona en las distintas fechas, se puede ver un cambio claro. El histograma amarillo representa la distribución antes de que la cuarentena se instaure, es decir en una situación de referencia, mientras que el celeste y el azul muestran la progresión gradual hacia más píxeles con valores bajos y menos con valores altos.

## CONCLUSIONES

Las imágenes de luz nocturna son una herramienta muy útil para cuantificar la presencia humana sobre el territorio. Durante los último años, al tener acceso a productos satelitales de luz nocturna de fácil acceso y análisis, conocer sus cualidades y limitaciones se ha tornado de importancia tanto para la investigación científica como para la gestión local.

En este sentido, debido a las correcciones adicionales que tiene, y a que es un promedio de muchas observaciones libres de nubes, las imágenes **mensuales** del sensor VIIRS parecen ser más adecuadas que las diarias para la mayoría de los casos de uso que puedan presentarse a los usuarios.

El análisis espaciotemporal realizado en este trabajo permite concluir que la contaminación lumínica se distribuye de forma desigual, principalmente emitida por zonas dedicadas al **transporte, tejidos urbanos y zonas industriales**. Adicionalmente, el hecho de que la radiancia sea marcadamente **mayor en invierno que en verano** da lugar a la generación de nuevas hipótesis que exploren la relación de esta característica con variables que no han sido abarcadas en este trabajo.

Si bien el uso de imágenes diarias sí dio resultados interesantes al estudiar la disminución de contaminación lumínica durante la cuarentena en Barcelona, dado que son las únicas imágenes diarias que se pueden conseguir fácilmente, si no se hacen las correcciones necesarias es importante tener en cuenta sus **múltiples limitaciones** al utilizarlas.

Las imágenes nocturnas mensuales de VIIRS muestran una sensibilidad adecuada para realizar un seguimiento a nivel comarcal, o incluso municipal de la emisión de luz nocturna en Cataluña. Esto es así a pesar de que su resolución espectral no permite diferenciar entre distintos tipos de luces. Tareas como estas deberán ser abordadas con el uso de sensores con resoluciones espaciales y espectrales más detalladas, seguramente aeroportados, desde luego comprometiendo la frecuencia de revisita.



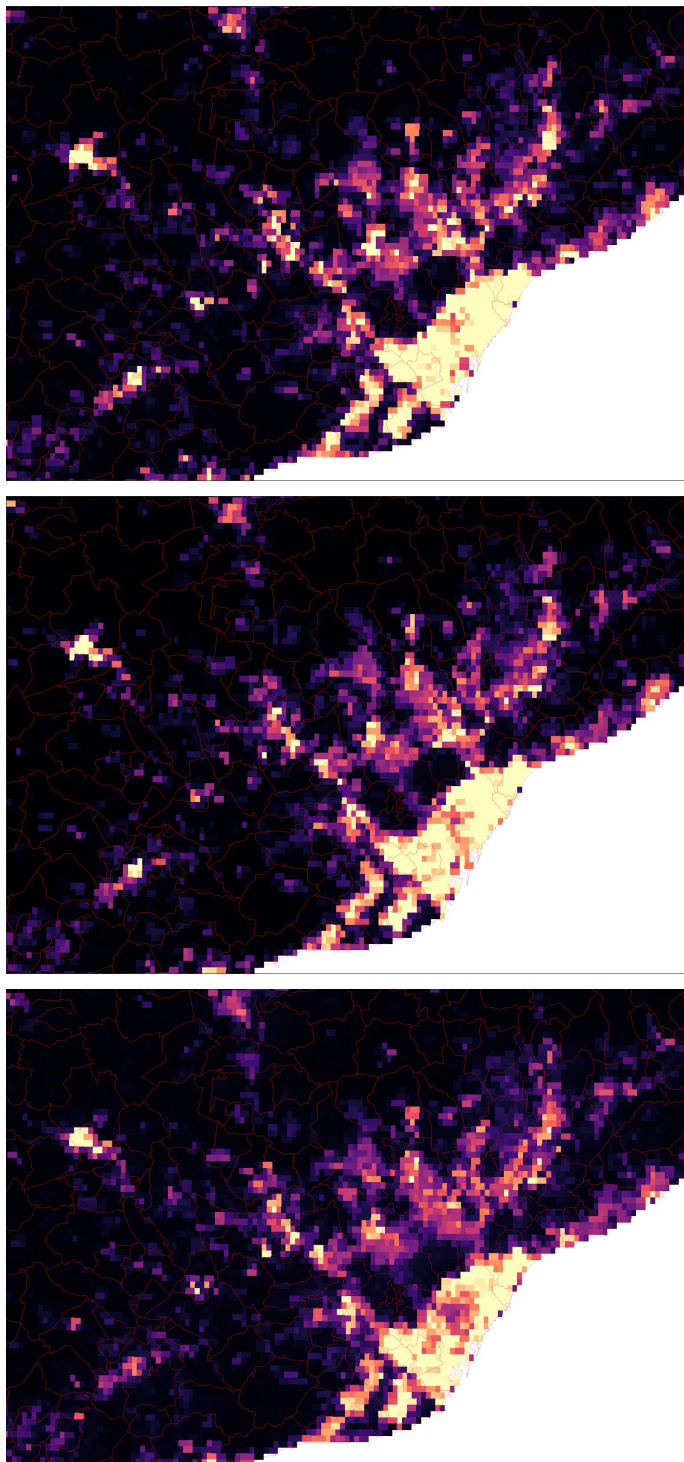
# REFERENCIAS

- Alamús, R., Bará, S., Corbera, J., Escofet, J., Palà, V., Pipia, L., & Tardà, A. (2017). Ground-based hyperspectral analysis of the urban nightscape. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 124, 16-26.
- Alfaro Navarro, E., Alfonso Garzón, J., Barrado Navascués, D., Bayo Arán, A., Bussonns Gordo, J., Caballero Hernández, J. A., ... & Fernandez Castro, T. (2009). 100 conceptos básicos de astronomía.
- Ballester Mora, Laura; Alamús Esteban, Ramón. Contaminación lumínica : análisis geoespacial a partir de imágenes de teledetección. 2017. 93 p. <<https://ddd.uab.cat/record/188592>>
- Bennie, J., Davies, T. W., Duffy, J. P., Inger, R., & Gaston, K. J. (2014). Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights. *Scientific reports*, 4(1), 1-6.
- CIE 126-1997: "Directrices para la minimización del brillo del cielo"
- Cinzano, P., Falchi, F., & Elvidge, C. D. (2001). The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 328(3), 689-707.
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C. D., & Baugh, K. E. (2000). The artificial night sky brightness mapped from DMSP satellite Operational Linescan System measurements. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318(3), 641-657.
- Doll, C. H., Muller, J. P., & Elvidge, C. D. (2000). Night-time imagery as a tool for global mapping of socioeconomic parameters and greenhouse gas emissions. *AMBIO: a Journal of the Human Environment*, 29(3), 157-162.
- Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., & Ghosh, T. (2017). VIIRS night-time lights. *International Journal of Remote Sensing*, 38(21), 5860-5879. doi:10.1080/01431161.2017.1342050
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Zhizhin, M., & Hsu, F. C. (2013). Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, 35(62).
- Elvidge, C. D., Sutton, P. C., Ghosh, T., Tuttle, B. T., Baugh, K. E., Bhaduri, B., & Bright, E. (2009). A global poverty map derived from satellite data. *Computers & Geosciences*, 35(8), 1652-1660.
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C., Elvidge, C. D., Baugh, K., ... & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science advances*, 2(6), e1600377.
- Garcia-Saenz, A., Sánchez de Miguel, A., Espinosa, A., Valentin, A., Aragonés, N., Llorca, J., ... & Tardón, A. (2018). Evaluating the association between artificial light-at-night exposure and breast and prostate cancer risk in Spain (MCC-Spain study). *Environmental health perspectives*, 126(4), 047011.

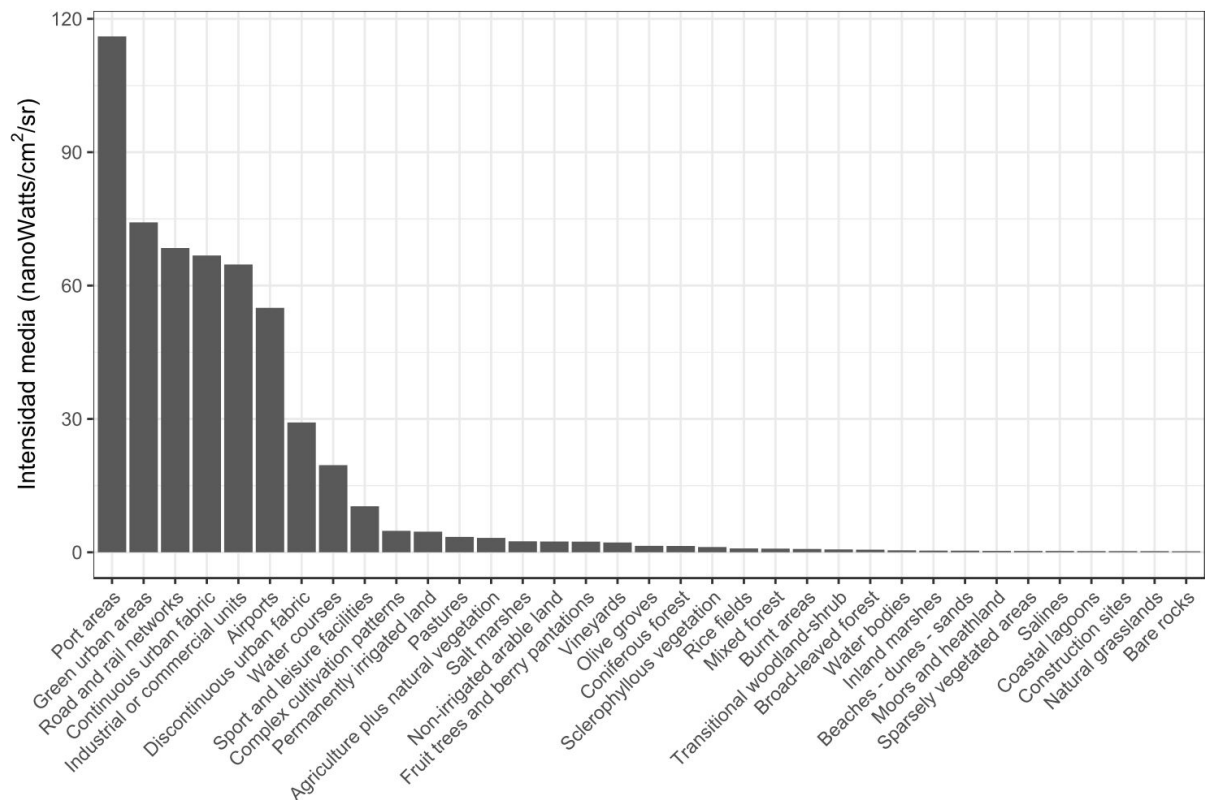


- Gillespie, T. W., Frankenberg, E., Fung Chum, K., & Thomas, D. (2014). Night-time lights time series of tsunami damage, recovery, and economic metrics in Sumatra, Indonesia. *Remote Sensing Letters*, 5(3), 286-294.
- International Dark-Sky Association. (2010). Visibility, environmental, and astronomical issues associated with blue-rich white outdoor lighting. Tucson-Washington, DC.
- Jung, K., & Kalko, E. K. (2010). Where forest meets urbanization: foraging plasticity of aerial insectivorous bats in an anthropogenically altered environment. *Journal of Mammalogy*, 91(1), 144-153.
- Kloog, I., Haim, A., Stevens, R. G., & Portnov, B. A. (2009). Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men. *Chronobiology international*, 26(1), 108-125.
- Kyba, C. C., Wagner, J. M., Kuechly, H. U., Walker, C. E., Elvidge, C. D., Falchi, F., ... & Hölker, F. (2013). Citizen science provides valuable data for monitoring global night sky luminance. *Scientific reports*, 3(1), 1-6.
- Letu, H., Hara, M., Yagi, H., Tana, G., & Nishio, F. (2009, May). Estimating the energy consumption with nighttime city light from the DMSP/OLS imagery. In *2009 Joint Urban Remote Sensing Event* (pp. 1-7). IEEE.
- Levin, N., Johansen, K., Hacker, J. M., & Phinn, S. (2014). A new source for high spatial resolution night time images—The EROS-B commercial satellite. *Remote Sensing of Environment*, 149, 1-12.
- Liao, L. B., Weiss, S., Mills, S., & Hauss, B. (2013). Suomi NPP VIIRS day-night band on-orbit performance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(22), 12-705.
- Lo, C. P. (2001). Modeling the population of China using DMSP operational linescan system nighttime data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 67(9), 1037-1047.
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 191-198.
- McConnell, A., Routledge, R., & Connors, B. M. (2010). Effect of artificial light on marine invertebrate and fish abundance in an area of salmon farming. *Marine Ecology Progress Series*, 419, 147-156.
- Ponce Lara, P. (2015). Estudio de la contaminación lumínica y eficiencia energética en alumbrado exterior.
- Sánchez de Miguel, A. (2016). *Variación espacial, temporal y espectral de la contaminación lumínica y sus fuentes: Metodología y resultados*. Universidad Complutense de Madrid.

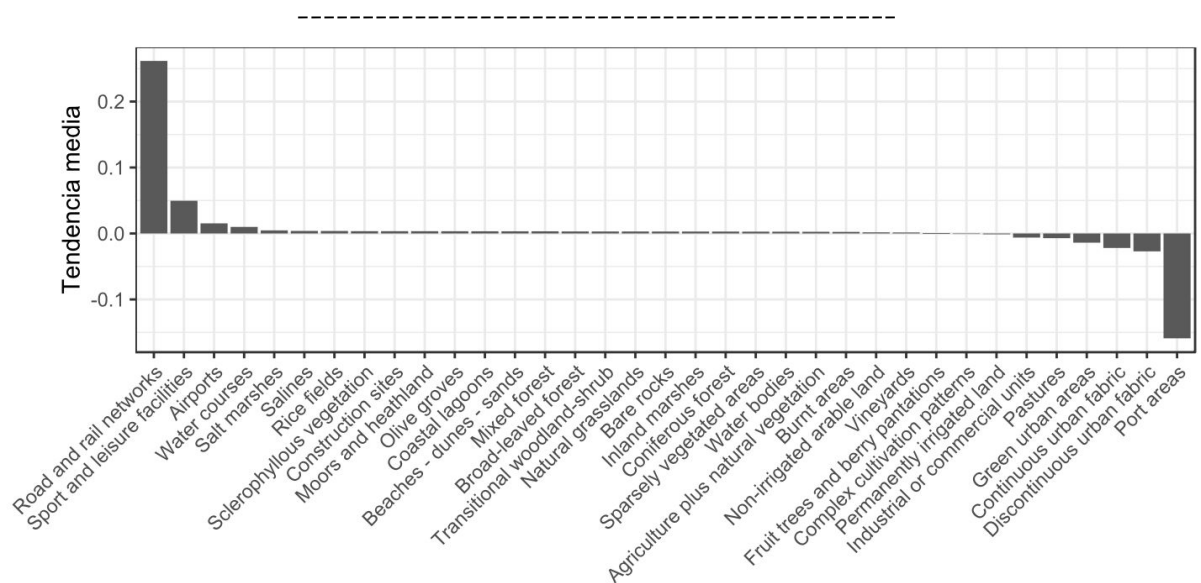
## ANEXOS



1. Imágenes de radiancia nocturna correspondientes al 6 de marzo (arriba), 27 de marzo (centro) y 26 de abril (abajo), con foco en el área metropolitana de Barcelona y sus cambios antes y después de la cuarentena.



2. Intensidad media de la radiancia en relación a la cobertura del suelo (categorías de CORINE Land Cover)



3. Tendencia de la radiancia en relación a la cobertura del suelo (categorías de CORINE Land Cover)